

цесорною системою керування дозволить повністю відмовитися від релейно-контакторної апаратури, забезпечить оптимальні режими керування тяговими й допоміжними навантаженнями, поліпшить експлуатаційні показники, підвищить безпеку руху. Мікропроцесорна система керування забезпечить задані характеристики електропривода на протязі всього терміну служби рухомого складу. Застосування мікропроцесорної системи керування дозволить також робити самодіагностику силового електрообладнання, фіксувати відмови в його роботі та позаштатні режими.

В Україні досвід використання на міському електротранспорті асинхронного тягового електропривода вже є. В Харкові на вагоноремонтному заводі обладнано асинхронним електроприводом один трамвайний вагон ТЗ, а ще три вагони в стадії модернізації. На переобладнаному вагоні ТЗ встановлено тягове електрообладнання російського виробництва. Більш доцільно використовувати тягове електрообладнання власного виробництва, оскільки це дозволило б завантажити замовленнями вітчизняні підприємства.

1.Крамаренко Р.М. Стан та основні напрямки удосконалення роботи міського електричного транспорту в сучасних умовах // Збірка доповідей міжнар. конф. «Міський електротранспорт. Забезпечення сталого функціонування і розвитку». – Ялта, 2008. – С.8-18.

2.Электрическое оборудование «ALSTOM TV PROGRESS» для транспортных средств. Каталог продукции. – Прага: ALSTOM Industry, 2006. – 24 с.

3.Носков В.И. и др. О создании тяговых асинхронных электроприводов в НПО «Электротяжмаш» // Новини енергетики. – 2001. – №9. – С.5-7.

Отримано 25.09.2009

УДК 629.421 : 629.405

Ю.С.КАЛИНИЧЕНКО, канд. техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

С.П.КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук

*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков*

А.А.ПИЛИПЕНКО

*ОАО «ОТИС», г.Харьков*

## **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ КОММУТАЦИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Анализируются факторы, определяющие коммутационную устойчивость тяговых двигателей, а также предложены пути повышения диапазона регулирования скорости и перегрузочной способности.

Аналізуються чинники, що визначають комутаційну стійкість тягових двигунів, а також запропоновано шляхи підвищення діапазону регулювання швидкості і перевантажувальної здатності.

The analysis of factors determining commutation stability of hauling engines is conducted, and also the ways of rise of range of adjusting of speed and shifting power are offered.

*Ключевые слова:* коммутация, тяговый двигатель, диапазон регулирования, расхождение областей безыскровой работы.

Значительные диапазоны изменения скорости характеризуются рядом негативных проявлений в работе машины, часть из которых может быть устранена. Например, проявление продольной коммутационной реакции якоря, которое при крайнем ослаблении поля может вызывать процессы самовозбуждения и связанную с этим нестабильность работы. Компенсацию такого проявления можно осуществить с помощью регулятора, имеющего отрицательную обратную связь по скорости.

Более серьезными являются проявления коммутационного характера, не устранимые посредством схем включения. Именно они в настоящее время лимитируют диапазоны рабочих режимов тяговых машин.

В стационарных режимах работы это расхождение областей безыскровой работы (ОБР), состоящее в том, что на верхней частоте вращения при ослабленном поле область безыскровой работы смещается в область отпитки добавочных полюсов. При соответствующем диапазоне регулирования скорости бывает невозможно обеспечить удовлетворительные условия коммутации для всего диапазона частот вращения.

Под переходными процессами в тяговых двигателях понимается, в основном, их питание от источника пульсирующего тока, каким является регулируемый силовой преобразователь. Толчкообразного изменения нагрузки, характерного для прокатных и некоторых классов общепромышленных машин, в электрической тяге не бывает. Пульсации тока и связанные с ними пульсации магнитного потока дополнительно осложняют условия коммутации. Пульсации основного магнитного потока приводят к наведению в коммутирующих секциях трансформаторной ЭДС, а пульсации потока дополнительных полюсов вызывают вихревые токи в элементах магнитопровода и, как следствие, демпфируют изменение коммутирующего магнитного поля относительно изменения тока. Для тяговых двигателей переход на питание от источника пульсирующего тока может вызвать дополнительное ограничение диапазонов по скорости и по моменту.

Анализ расхождения ОБР при регулировании частоты вращения [1-3] приводит к следующим причинам этого явления:

- влияние на баланс ЭДС, действующих в коммутирующем контуре, постоянного падения напряжения в щеточном контакте (пере-

ходного падения)  $\Delta U_{щ}$ , действие которого нарушает баланс ЭДС в сторону отпитки добавочных полюсов при увеличении частоты вращения в  $k$  раз в соответствии с зависимостью между ЭДС коммутирующей  $e_k$  и реактивной  $e_r$ :

$$ke_k = ke_r + \Delta U_{щ}; \quad (1)$$

– замедление роста реактивной ЭДС вследствие действия в коммутирующем контуре вихревых токов, интенсивность которых увеличивается с увеличением частоты вращения и приводит к снижению индуктивности секции;

– проявления нелинейности свойств магнитной цепи добавочных полюсов, ее насыщенное состояние при номинальной частоте вращения (полном магнитном поле) и восстановление линейных свойств при увеличении частоты вращения и ослаблении поля.

Хотя перечисленные факторы действуют в одном направлении, но влияние каждого из них в разных двигателях бывает различно. Первый фактор, связанный с влиянием постоянного переходного падения напряжения  $\Delta U_{щ}$ , одинаково проявляется для двигателей разных классов, поскольку зависит от величины реактивной ЭДС, уровень которой в двигателях сравним. Авторитетные исследователи [4] считали именно этот фактор основным в расхождении ОБР при разных частотах вращения. Однако, даже двигатели определенного типа обладают различной коммутационной устойчивостью (способностью удовлетворительно коммутировать в различных рабочих режимах, в том числе во всем диапазоне частот вращения). Очевидно, что главное различие в коммутационной устойчивости двигателей в стационарных режимах определяют два последние фактора из перечисленных выше.

Фактор параметрических изменений коммутирующей секции (снижения ее индуктивности и увеличения активного сопротивления при уменьшении периода коммутации) связан с действием вихревых токов. Природа последних связана с известным в электротехнике поверхностным эффектом, вызванным изменением магнитного поля рассеивания в пазовой части якоря за период коммутации. Для уменьшения параметрических изменений секции при различных частотах вращения рекомендуются [4] такие же меры, как и для снижения добавочных потерь в якоре от действия вихревых токов, вызванных переменным магнитным полем при вращении. Среди этих мер – подразделение эффективного проводника на элементарные, ограничения проводников и пазов по высоте, транспозиция проводников в пазу.

Нелинейность свойств магнитной цепи добавочных полюсов (последний фактор) в исследовании коммутационной устойчивости учи-

тывается как некая погрешность, связанная с недостатками конструкторской и расчетной проработки на этапе проектирования двигателя. Аксиоматичным считается тот факт, что магнитная цепь добавочных полюсов обязана во всех рабочих режимах быть линейной. При этом на этапе электромагнитного расчета подробно исследуется картина магнитного рассеивания и проверяется магнитное насыщение сердечника добавочного полюса. Взаимное влияние полей главных и добавочных полюсов не производится в силу их ортогональности.

Тяговые двигатели, как класс двигателей, имеют особенности конструктивного и общего характера, которые обуславливают специфику влияния обозначенных факторов. Применение в тяге якорных секций с целой (неразрезной) головкой лобовой части автоматически предполагает транспозицию проводников в пазовой части якоря, что существенно ограничивает и параметрические изменения секций. Также конструкции с горизонтально-вертикальной укладкой секций в пазу значительно снижают параметрические изменения. Относительно невысокие значения линейной нагрузки позволяют проектировать неглубокие пазы якоря. Перечисленные особенности отодвигают фактор параметрических изменений якорной секции на второй план.

Напротив, проявление нелинейных свойств магнитной цепи для тяговых двигателей оказывается особенно актуальным. Ортогональность магнитных потоков главных и добавочных полюсов лишь в линейных цепях позволяет утверждать их взаимную независимость (принцип суперпозиции полей). Проявления нелинейности оказываются у тяговых двигателей наиболее серьезными на путях совместного прохождения этих потоков в участках станины и якоря. Анализ магнитной цепи тяговой электрической машины показывает, что в участках станины и якоря в двигательном режиме работы между главным и добавочным полюсами противоположной полярности их магнитные потоки направлены согласно, а на аналогичных участках между полюсами одной полярности встречно. Такое прохождение потоков вызывает асимметрию магнитной цепи машины. Участки совместного прохождения потоков главного и добавочного полюса могут оказаться насыщенными в магнитном отношении и иметь нелинейные свойства, тогда как аналогичные участки встречного прохождения потоков будут всегда линейными. Применение в тяговых двигателях последовательной обмотки возбуждения может приводить в перегрузочных режимах к крайнему насыщению участков совместного прохождения потоков. Наибольшее внимание здесь должно уделяться участкам станины, поскольку они имеют максимальные длины магнитных силовых линий, выполнены, как правило, литыми или из конструкционных ста-

лей, обладающих худшими магнитными свойствами в сравнении в электротехническими марками стали. Как показывают расчеты, в перегрузочных режимах магнитное сопротивление этих участков становится сравнимым с сопротивлением воздушных зазоров машины. Аналогичные участки якоря имеют значительно меньшие сопротивления, да и снизить уровень асимметрии плеч магнитной цепи в якоре, как правило, не предоставляется возможным, поскольку подобные рекомендации сводятся к переходу на больший габарит.

Итак, магнитная асимметрия в станине и является одним из главных факторов ограничения диапазонов скорости и перегрузок в тяговых двигателях, поэтому ее следует всячески ограничивать. Превышение магнитной индукции в станине в номинальном режиме свыше уровня  $1 \div 1,1$  Тл приводит к ощутимой асимметрии в рабочих режимах и способно снизить диапазон регулирования скорости двигателя. Для тяговых двигателей 16 и больших габаритов целесообразен переход на шестиполусную магнитную систему, при этом понижается величина магнитного потока на полюс.

Актуальность оценки влияния асимметрии магнитной цепи на рабочие режимы тягового двигателя требует создания достоверных расчетных методик. В качестве таких методов могут быть предложены методы расчета магнитных полей в машине численными методами (конечных элементов и др.), но для практической инженерной оценки этого явления эффективен известный метод схем замещения магнитной цепи тягового двигателя.

Схема замещения магнитной цепи ТЭД представлена на рисунке. Она содержит источники МДС  $F$ , представляющие действия соответствующих обмоток, и магнитные проводимости  $Y$  линейные для участков воздушных зазоров и путей рассеяния и нелинейные для стальных участков магнитопровода. Схема наглядно привязана к реальной магнитной системе, приведенной к двухполюсному виду.

Поскольку схема (рисунок) содержит нелинейные элементы, процесс ее решения является итерационным. В основу одного цикла итераций может быть положен, например, метод узловых потенциалов. В этом случае, система уравнений формируется топологическими методами в матричном виде. Матрицы узловых проводимостей  $G_u$  и узловых токов  $I_u$  определяются через диагональную матрицу проводимостей ветвей  $G$  и матрицу соединений схемы  $C$ , как:

$$G_u = C \cdot G \cdot C^T, \quad I_u = -C \cdot G \cdot E, \quad (2)$$

где  $E$  – вектор-столбец МДС ветвей.

Матричное уравнение метода узловых потенциалов

$$G_u \cdot \varphi = I_u. \quad (3)$$

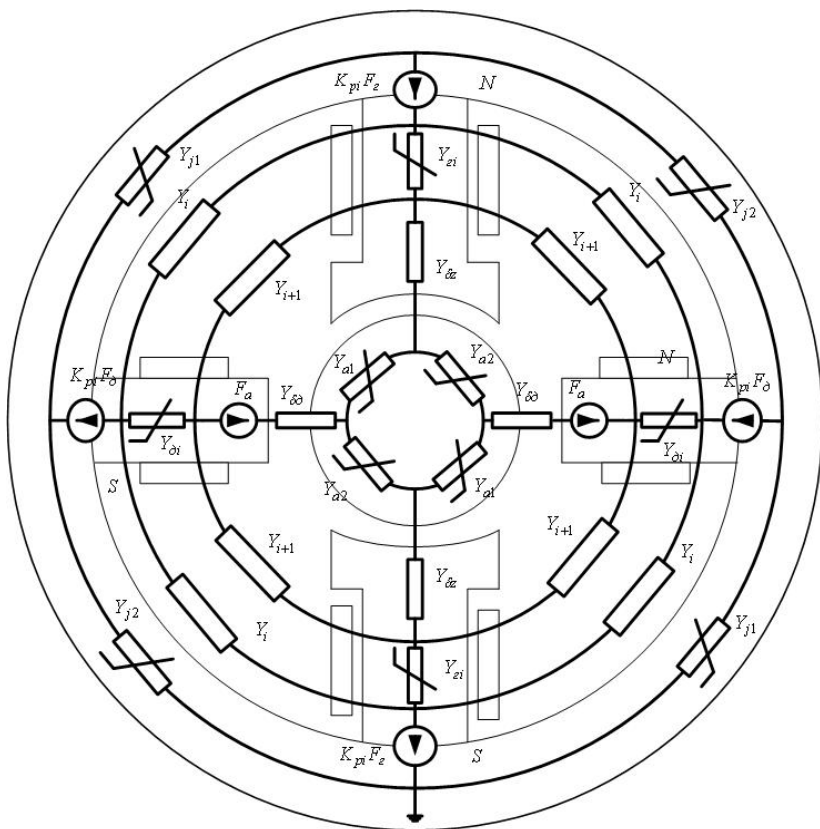


Схема замещения магнитной цепи тягового двигателя

После решения матричного уравнения (3) определяются потоки в ветвях  $\Phi$  при помощи второго закона Кирхгофа в матричном виде:

$$\Phi = G \cdot (\Phi \cdot C + E). \quad (4)$$

Определение нелинейных проводимостей (участков якоря, статорины, полюсов) в схеме выполняется по известной формуле

$$Y_{\text{нл}} = \mu_y \frac{S_y}{l_y} 10^{-8} \text{ (Гн)}, \quad (5)$$

где магнитная проводимость  $\mu_y = \frac{B_y}{H_y} \left( \frac{\text{Гс} \times \text{см}}{\text{А}} \right)$  определяется по соответствующей кривой намагничивания стали в зависимости от маг-

нитной индукции  $B_y$  в Гс;  $S_y$ ,  $l_y$  – площадь поперечного сечения и длина участка соответственно.

Источники схемы представлены МДС соответствующих обмоток: якоря  $F_a$ , ДП –  $F_d$ , возбуждения –  $F_g$ . Коэффициенты распределения в межполюсном окне  $k_{pi}$  для  $i$ -го участка схемы определяются относительной величиной МДС соответствующей обмотки, приходящейся на  $i$ -й участок.

Проводимости линейных элементов (путей рассеяния, воздушных зазоров) могут быть определены либо построением трубок проводимости, либо методами конформного преобразования.

При помощи схемы замещения могут быть исследованы и ограничения рабочих диапазонов скорости и момента, связанных с переходными процессами. При этом в состав ветвей, соответствующих участкам магнитопровода, в которых действуют вихревые токи, включаются соответствующие источники, выраженные через операторные функции [5]. Получаемое решение для небалансного потока добавочных полюсов  $\Delta F_k(p)$  будет в операторном виде. Это обстоятельство показывает универсальность метода схем замещения для анализа ряда задач магнитной цепи двигателя, что показывает преимущество данного метода перед численными расчетами полей в машине.

Подводя итоги, следует отметить, что тяговые двигатели, спроектированные без учета факторов, ограничивающих их коммутационную устойчивость, зачастую не могут удовлетворять требованиям ГОСТа относительно перегрузок и диапазона частоты вращения. Одним из главных факторов, влияющих на рабочие диапазоны, следует считать в тяговых двигателях состояние магнитной цепи станины.

1.Калиниченко Ю.С., Калиниченко С.П. Особенности проектирования двигателей постоянного тока // Техническая электродинамика, 1989.–№5.–Киев, с 34 - 38

2.Калиниченко Ю.С., Калиниченко С.П., Карпенко Н.П. Особенности расчета магнитной цепи добавочных полюсов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – №1. – С.12-15.

3.Иногородский А.В. Исследование широкорегулируемых двигателей средней мощности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Харьков, 1973. – 26 с.

4.Давидчук Г.А., Пашкевич В.И., Фетисов В.В. Оценка влияния демпфирования пазового поля на процесс коммутации машины постоянного тока // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 1980. – №5. – С.12-14.

5.Калиниченко Ю.С., Калиниченко С.П. Вытеснение тока в проводниках обмотки якоря при коммутации // Техническая электродинамика. – 1989. – №5. – С.23-29.

*Получено 29.09.2009*